

# 夏季桑沟湾养殖水域有机碳的平面分布特征及其来源分析

夏斌 陈碧鹃 崔毅\* 崔正国 张旭志 刘淮德 丁东生 蒋增杰

(农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室  
中国水产科学研究院黄海水产研究所 碳汇渔业实验室, 青岛 266071)

**摘要** 根据2012年8月对桑沟湾养殖海域18个站位取得的溶解有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)和叶绿素a(Chl-a)数据,基于不同区域的养殖特点,分析了DOC和POC的平面分布特征,并对POC的来源进行了初步探讨。结果表明,整个调查海域表层DOC的浓度范围为1.70~2.82 mg/L,平均值为2.03 mg/L,大致呈自西向东递减的趋势。表层POC的浓度范围为0.04~1.33 mg/L,平均值为0.55 mg/L,大致呈自南向北逐渐递增的趋势。网箱养殖区表层DOC和POC含量最高,其次为桑沟湾近岸海域,而海带养殖区最低,这表明有机碳的含量与养殖品种和模式有直接的关系。根据POC/Chl-a比值对POC来源进行初步分析,表明贝类养殖区、海带养殖区、贝藻混养区、桑沟湾近岸海域以及外海对照点的POC主要来自活的浮游植物,而网箱养殖区存在降解的有机物质。

**关键词** 桑沟湾 有机碳 分布特征 碳循环 来源

**中图分类号** S912 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2013)01-0044-06

## Distribution and source of organic carbon in Sanggou Bay in summer

XIA Bin CHEN Bi-juan CUI Yi\* CUI Zheng-guo ZHANG Xu-zhi  
LIU Huai-de DING Dong-sheng JIANG Zeng-jie

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Shandong Provincial Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Qingdao 266071)

**ABSTRACT** Based on the analysis of dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC) and chlorophyll a (Chl-a) of the water samples collected from eighteen stations in Sanggou Bay in August, 2012, according to the different aquaculture characteristics, the horizontal distribution of DOC and POC, and the source of POC were discussed. The results showed that the concentrations of DOC ranged from 1.70 mg/L to 2.82 mg/L, with an average of 2.03 mg/L. The DOC demonstrated a decreasing trend from the west to the east. The concentration of POC ranged from 0.04 mg/L to 1.33 mg/L, with the average of 0.55 mg/L. The POC demonstrated an increasing trend from the south to the north. The concentrations of DOC

国家自然科学基金青年基金(41206100)、山东省自然科学基金(ZR2010CQ023)、中国水产科学研究院基本科研业务费(2012A0202)、国家海洋局项目(DOMEP (MEA)-01-01)和国家海洋局项目[DOMEP (MEA)-02]共同资助

\* 通讯作者。E-mail: cui@ysfri. ac. cn, Tel: (0532) 85836341

收稿日期: 2012-09-29; 接受日期: 2012-12-04

作者简介: 夏斌(1981-), 男, 助理研究员, 主要从事海洋生态环境研究。E-mail: xiabin@ysfri. ac. cn, Tel: (0532) 85836341

and POC in net-cage culture area showed the highest values, followed by the coastal waters of Sanggou Bay. The DOC and POC concentrations were the lowest in the kelp culture area, indicating a direct relationship between the concentration of organic carbon and aquaculture species. Preliminary analysis of the source of POC based the POC/Chl-a ratios, showed that the living phytoplankton were the main source of POC in the bivalve, kelp, and bivalve-seaweed aquaculture areas, the coastal water and the offshore control area, while degraded organic matter was found in the net-cage culture area.

**KEY WORDS** Sanggou Bay Organic carbon Distribution Carbon cycle  
Source

碳是主要的生源要素,更是生命活动能流物流中最重要元素,几乎所有的生物地球化学循环过程都与它有关。全球碳循环是国际地圈-生物圈计划(IGBP)的核心问题之一。全球化石燃料燃烧每年以  $\text{CO}_2$  的形式向大气排放的碳约为 6Gt,其中海洋吸收  $\text{CO}_2$  的碳量为 2.2Gt/a,约占人类排放总量的 1/3 左右(Beatriz *et al.* 2001),因此,海洋在碳的源-汇研究中起着至关重要的作用。陆架边缘海是陆地和大洋的连接带,是海洋碳循环异常活跃的区域,一方面因为它是受人类活动和陆地径流输入影响较大的区域,另外一方面它又是人类水产养殖活动最集中的区域,发生的生物地球化学循环比较复杂。海洋有机碳循环是海洋碳循环的重要组成部分,海水中的有机碳主要以溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)形式存在。中国是世界第一水产养殖大国,贝、藻类是海水养殖的主要品种。大型海藻通过光合作用能有效吸收海水中的碳、氮、磷等生源要素;滤食性贝类通过摄食活动可以去除海水中的颗粒有机碳(POC),但大部分又以生物沉积的形式排入海底,同时部分生物沉积物通过潮流等的再悬浮作用又回到水层中(Widdows *et al.* 1998),因此贝藻养殖区海洋碳循环的研究对于人类探索浅海“遗漏的碳汇”问题显得尤为重要(张继红等 2005)。

桑沟湾位于山东半岛东端,总面积 133.3 $\text{km}^2$ ,通过宽 10 km 的湾口与黄海相连。自 20 世纪 80 年代开始大规模的养殖活动,养殖品种主要包括海带 *Laminaria japonica*、牡蛎 *Crassostrea gigas* 和栉孔扇贝 *Chlamys farreri* 等,已成为我国北方重要的半封闭型海湾规模化海水养殖示范区。目前关于桑沟湾碳循环的研究还很少,如孙耀等(2000)研究了桑沟湾养殖海域 POC 的分布与特征;张继红等(2006)研究了栉孔扇贝对桑沟湾 POC 的利用率和对初级生产的摄食压力;张明亮等(2011)研究了养殖栉孔扇贝对桑沟湾碳循环的贡献。但是按照不同养殖区域研究桑沟湾有机碳的平面分布特征并对 POC 进行来源分析尚没有报道。本研究通过 2012 年 8 月对桑沟湾养殖区进行科研调查,分析了桑沟湾养殖区有机碳的分布特征、来源和影响因素,对于今后研究碳汇渔业,认识贝类养殖对近海碳循环的影响具有重要意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样站位与时间

2012 年 8 月 7 日对桑沟湾海域进行科研调查,共布设 18 个站位,其中第 1、2、11、13、14、15 号站位位于贝类养殖区,第 3、4、6 号站位位于海带养殖区,第 7、8、10、16、17 号站位位于贝类和海带混养区,第 18 号站位位于网箱养殖区,第 9、12 号站位位于桑沟湾近岸海域,第 5 号站位位于外海区域,为对照点,其经纬度为  $122^\circ 37' 55.92''\text{E}$ ,  $37^\circ 8' 58.2''\text{N}$ ,距离海带养殖区约 1.7km。调查站位如图 1 所示。

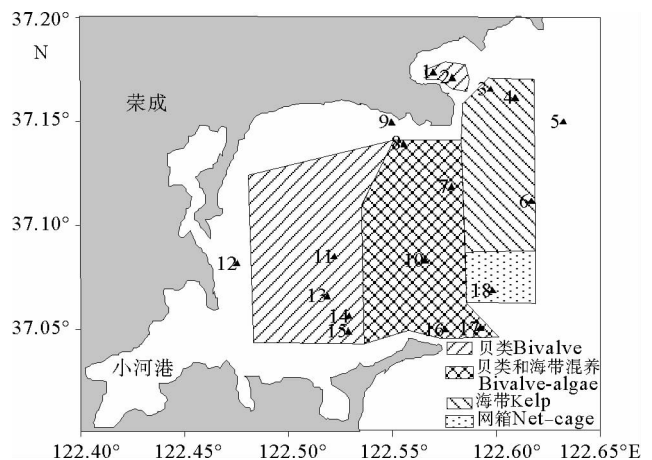


图 1 桑沟湾调查站位

Fig. 1 Sampling stations in Sanggou Bay

## 1.2 测定参数与分析方法

测定参数包括:温度、盐度、叶绿素 a(Chl-a)、溶解有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、总悬浮颗粒物(TSS)。水样用 Niskin 采水器采集,采样层次为表层。温度、盐度均由哈希多参数水质分析仪测定。Chl-a 采用紫外-可见光分光光度计进行测定。Chl-a 和 TSS 的测定均按照《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)中所规定的方法进行。DOC 和 POC 的前处理方法参照丁雁雁等(2012)和 Xia 等(2011)。DOC 采用日本岛津公司 TOC-V<sub>CPH</sub> 总有机碳分析仪测定,POC 采用德国 Elementar 公司 Vario EL III 型元素分析仪测定。每个样品平行测定 3 次,取其平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 DOC 的浓度及分布特征

DOC 是海洋中最大的有机碳储库,占海洋有机碳含量的 80%~95%(Toggweiler 1988),其总量大致相当于全球大气中 CO<sub>2</sub> 的含碳量(Hedges 1992),这一巨大含量使得 DOC 在海洋碳循环中扮演着十分重要的角色。此外,DOC 的研究也是生物地球化学的重要研究内容,在整个海洋生态系统中起着至关重要的作用,它既可以表征水体中有机物含量和生物活动水平,又为海洋生产力的研究提供基本参数,还可判断海洋污染的程度(Collins *et al.* 1977)。

整个调查区域表层 DOC 的浓度范围为 1.70~2.82mg/L,平均值为 2.03 mg/L。其中,贝类养殖区表层 DOC 的浓度范围为 1.96~2.33mg/L,平均值为 2.08 mg/L;海带养殖区表层 DOC 的浓度范围为 1.70~2.82mg/L,平均值为 1.99 mg/L;贝类和海带混合养殖区表层 DOC 的浓度范围为 1.83~2.11mg/L,平均值为 1.98 mg/L;近岸第 9 号站表层 DOC 的浓度为 1.82 mg/L,第 12 号站表层 DOC 的浓度为 2.51 mg/L;外海第 5 号站表层 DOC 的浓度为 2.14 mg/L;网箱养殖区第 18 号站表层 DOC 的浓度为 2.82mg/L。从水平分布看,大致呈自西向东递减的趋势,在湾口处及近岸海域形成一个高值区域,低值区出现在桑沟湾的东北部(图 2)。从区域分析,网箱养殖区表层 DOC 含量最高,其次为桑沟湾近岸海域,海带养殖区最低(图 3)。这主要是因为网箱多是采取高密度的投饵养殖,未食的残饵、养殖生物的尸体及排泄物等在养殖区大量积累,极易对养殖水体形成污染,进而导致富营养化(Wu *et al.* 1994)。

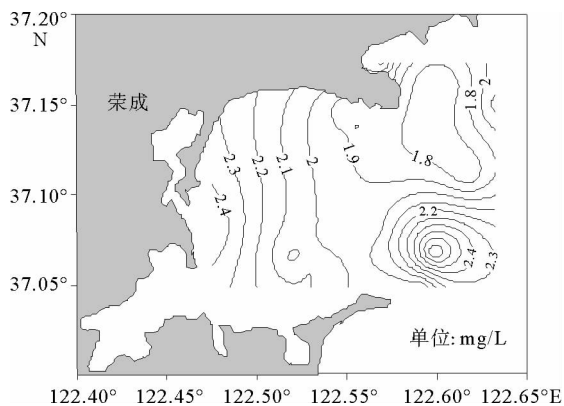


图 2 表层 DOC 的平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of DOC in surface water

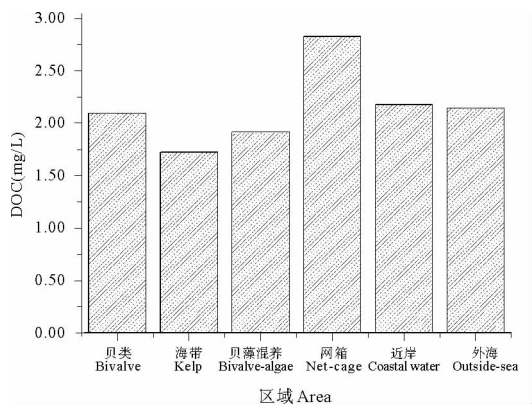


图 3 表层 DOC 的区域分布

Fig. 3 Regional distribution of DOC in surface water

### 2.2 POC 的浓度及分布特征

POC 是海水中碳固化和迁移输出的主要形式,占海洋有机碳含量的 10%左右(Hung *et al.* 2000)。

POC 与生物的生命过程、初级生产力密切相关,是生物食物链中一个重要的物质基础。虽然海水中的 POC 含量只是 DOC 含量的 1/10 左右,但是在海洋初级生产产品中 POC 与 DOC 的比值为 5 : 1(焦念志等 1994)。

整个调查区域表层 POC 的浓度范围为 0.04~1.33mg/L,平均值为 0.55 mg/L。其中贝类养殖区表层 POC 的浓度范围为 0.04~1.09mg/L,平均值为 0.44 mg/L;海带养殖区表层 POC 的浓度范围为 0.04~0.58mg/L,平均值为 0.36 mg/L;贝类和海带混合养殖区表层 POC 的浓度范围为 0.44~0.91mg/L,平均值为 0.63 mg/L;近岸第 9 号站表层 POC 的浓度为 0.77 mg/L,第 12 号站表层 POC 的浓度为 0.57 mg/L;外海第 5 号站表层 POC 的浓度为 0.40 mg/L;网箱养殖区第 18 号站表层 POC 的浓度为 1.33mg/L。从水平分布看,在桑沟湾内大致呈自南向北逐渐递增的趋势;在桑沟湾口部大致呈自南向北逐渐递减的趋势。在湾口处及近岸海域形成一个高值区域,低值区出现在桑沟湾的东北部(图 4)。从区域分析,网箱养殖区表层 POC 含量最高,其次为桑沟湾近岸海域,海带养殖区最低(图 5)。这与表层 DOC 的区域分布保持一致。虽然桑沟湾贝类养殖密度大,生物量高,大量的有机碳以生物沉积的形式迁移至海底,每年生物沉积碳高达  $8.71 \times 10^4$  t(张明亮等 2011),但贝类养殖区 POC 含量仅为 0.44mg/L,低于网箱养殖区和近岸海域,这主要是由于桑沟湾内分布着密集的养殖设施和养殖生物,极大地削弱了海流,从而使生物沉积碳很难被再悬浮(Martin *et al.* 2006)。

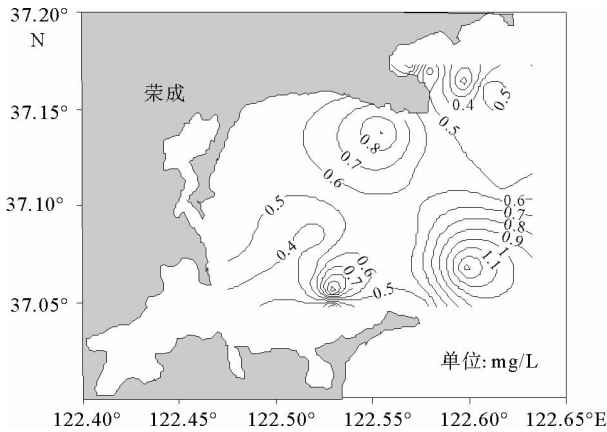


图 4 表层 POC 的平面分布

Fig. 4 Horizontal distribution of POC in surface water

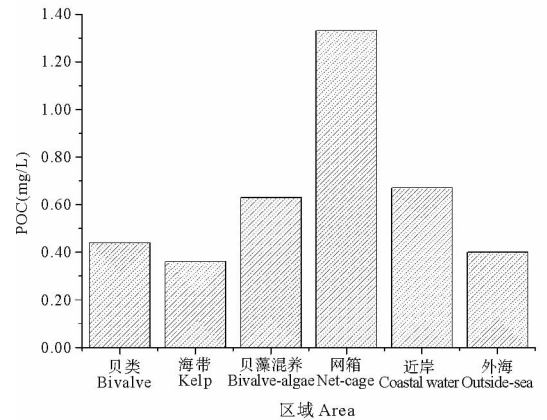


图 5 表层 POC 的区域分布

Fig. 5 Regional distribution of POC in surface water

### 2.3 Chl-a 的浓度及分布特征

Chl-a 是浮游植物进行光合作用的主要色素,同时也是表征海洋初级生产者浮游植物生物量的一个重要指标,在一定程度上反映了水域初级生产者通过光合作用生产有机碳的能力(海洋初级生产力)。浮游植物通过光合作用合成有机碳是海洋中 DOC 的主要来源之一,海洋中 DOC 的浓度及时空分布和浮游植物的生长、分布有密切关系。

整个调查区域表层 Chl-a 的浓度范围为 2.46~8.16  $\mu\text{g/L}$ ,平均值为 4.34  $\mu\text{g/L}$ 。其中,贝类养殖区表层 Chl-a 的浓度范围为 2.93~6.23  $\mu\text{g/L}$ ,平均值为 4.38  $\mu\text{g/L}$ ;海带养殖区表层 Chl-a 的浓度范围为 2.46~3.78  $\mu\text{g/L}$ ,平均值为 3.24  $\mu\text{g/L}$ ;贝类和海带混合养殖区表层 Chl-a 的浓度范围为 2.55~6.25  $\mu\text{g/L}$ ,平均值为 4.54  $\mu\text{g/L}$ ;近岸第 9 号站表层 Chl-a 的浓度为 8.16  $\mu\text{g/L}$ ,第 12 号站表层 Chl-a 的浓度为 4.81  $\mu\text{g/L}$ ;网箱养殖区第 18 号站表层 Chl-a 的浓度为 2.72  $\mu\text{g/L}$ ;外海第 5 号站表层 Chl-a 的浓度为 3.66  $\mu\text{g/L}$ 。从水平分布看,大致呈自南向北逐渐递增的趋势,在桑沟湾近岸海域形成一个高值区,低值区出现在桑沟湾口处(图 6)。从区域分析,桑沟湾近岸海域表层 Chl-a 含量最高,其次为贝藻混养区域,网箱养殖区最低(图 7)。所以,桑沟湾海域 Chl-a 的平面分布主要受养殖品种、陆地径流和外源输入的共同影响,贝藻养殖模式及营养盐的陆源输入是影响 Chl-a 分布格局的重要因素。这与郝林华等(2012)的研究结果基本一致。

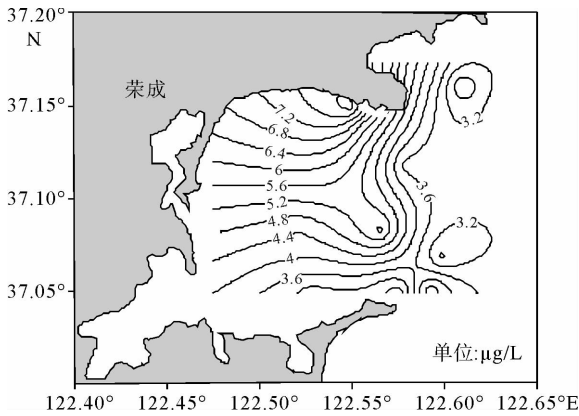


图 6 表层 Chl-a 的平面分布

Fig. 6 Horizontal distribution of Chl-a in surface water

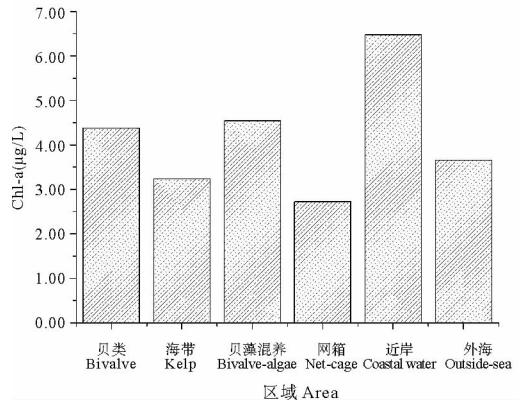


图 7 表层 Chl-a 的区域分布

Fig. 7 Regional distribution of Chl-a in surface water

### 2.4 POC 的来源分析

颗粒中有机碳的质量分数(%)是 TSS 的一个重要性质,可以根据这种性质来判断 TSS 的来源,含量相似则可能反应来源一致,含量波动范围大则说明 TSS 具有不同的来源(Zhang *et al.* 1992)。从整个调查区域 POC%与 TSS 的关系来看(图 8),表层 POC%随 TSS 的增加整体上呈指数降低趋势,原因可能是随着 TSS 的降低,水体的透光性增强,浮游植物的光合作用增强,对颗粒有机碳的贡献增大,POC%会随着 TSS 的降低而升高。按照不同的养殖区域对桑沟湾表层 POC%与 TSS 进行相关性分析(图 8),贝类养殖区、海带养殖区和贝藻混养区的表层 POC%含量波动范围较大,这表明表层 TSS 具有不同来源,受陆源输入和生物活动等多重因素的影响。

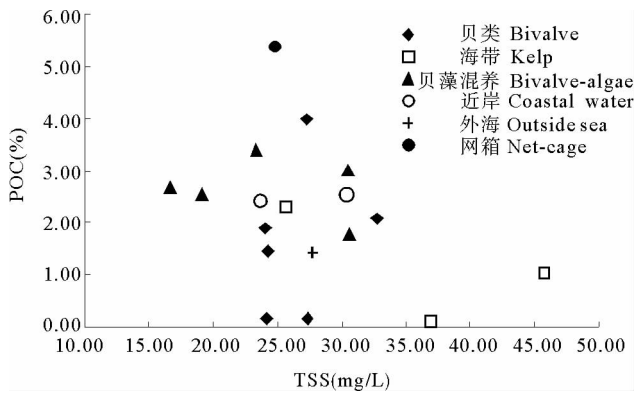


图 8 表层 POC 与 TSS 的相关性

Fig. 8 Correlation between POC and TSS

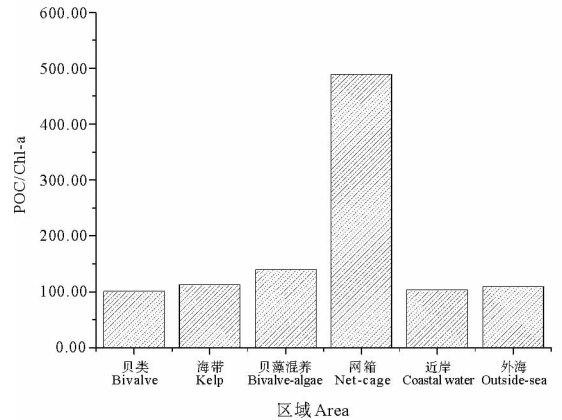


图 9 桑沟湾不同区域 POC/Chl-a 比值

Fig. 9 The POC/Chl-a ratios in different regions of Sanggou Bay

POC/Chl-a 的比值可以表征非生命态颗粒有机碳对总的颗粒有机碳的贡献。POC/Chl-a 值在 20~200 之间时说明有机质主要来源于活的浮游植物(Cifuentes *et al.* 1988)。在天然深海硅藻种中,POC/Chl-a 在 10~154 之间(Jonge 1980)。当 POC/Chl-a > 200,表明降解有机物质的存在(Cifuentes *et al.* 1988)。如图 9 所示,本次调查网箱养殖区 POC/Chl-a 值最大,为 489.06,表明在该区域存在降解有机物质。其次为贝藻混养养殖区,POC/Chl-a 为 139.62;海带养殖区为 112.27,外海区域对照点为 108.88,桑沟湾近岸海域为 103.17,最小为贝类养殖区,为 100.46。除网箱养殖区外,其他区域 POC/Chl-a 均在 20~200 之间,表明这些区域有机

质主要来自活的浮游植物。本研究只是根据 POC/Chl-a 值对 POC 的来源做了初步的探讨,但由于养殖区 POC 的来源比较复杂,今后还应结合其他方法,如 C/N 法和碳稳定同位素法(Andres *et al.* 1998; Mccalister *et al.* 2006; Middelburg *et al.* 1998),进行深入研究才能作出更为准确的判断。

### 3 结论

1) 整个调查海域表层 DOC 的浓度范围为 1.70~2.82mg/L,平均值为 2.03 mg/L,大致呈自西向东递减的趋势,在湾口处及近岸海域形成一个高值区,低值区出现在桑沟湾的东北部。表层 DOC 网箱养殖区含量最高,其次为桑沟湾近岸海域,而海带养殖区最低。

2) 表层 POC 的浓度范围为 0.04~1.33mg/L,平均值为 0.55 mg/L,从水平分布看,在桑沟湾内大致呈自南向北逐渐递增的趋势;在桑沟湾口部大致呈自南向北逐渐递减的趋势。在湾口处及近岸海域形成一个高值区,低值区出现在桑沟湾的东北部。表层 POC 网箱养殖区含量最高,其次为桑沟湾近岸海域,而海带养殖区最低。

3) 根据 POC/Chl-a 初步分析,表明贝类养殖区、海带养殖区、贝藻混养区、近海海域以及外海对照点的 POC 主要来自活的浮游植物,而网箱养殖区存在降解的有机物质。

### 参 考 文 献

- 丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁. 2012. 春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征. 环境科学, 33(1):37-41
- 孙 耀,方建光,孙慧玲,宋云利,匡世煊. 2000. 桑沟湾养殖海域悬浮颗粒态有机碳的分布与特征. 水产学报, 24(4):329-333
- 张明亮,邹 建,毛玉泽,张继红,方建光. 2011. 养殖栉孔扇贝对桑沟湾碳循环的贡献. 渔业现代化, 38(4):13-16,31
- 张继红,方建光. 2006. 栉孔扇贝对春季桑沟湾颗粒有机物的摄食压力. 水产学报, 30(2):277-280
- 张继红,方建光,唐启升. 2005. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献. 地球科学进展, 20(3):359-365
- 郝林华,孙丕喜,郝建民,杜蓓蓓,张新军,徐玉珊,毕进红. 2012. 桑沟湾海域叶绿素 a 的时空分布特征及影响因素研究. 生态环境学报, 21(2):338-345
- 焦念志,王 荣. 1994. 海洋初级生产光动力学及产品结构. 海洋学报, 16(5):85-91
- Andres JE, Greenway AM, Dennis PF. 1998. Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: Hunts Bay, Kingston Harbour, Jamaica. Estuarine, Coastal and Shelf Science 46(5):743-756
- Beatriz MB, Michael JRF, Margaret CB. 2001. Ocean Biogeochemistry and global change. ICBP Science 2:1-36
- Cifuentes LA, Sharp JH, Fogel ML. 1988. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary. Limnology and Oceanography 33:1102-1115
- Collins KJ, Le PJ, Williams B. 1977. An automated photochemical method for the determination of dissolved organic carbon in sea and estuarine waters. Mar Chem 5(2):123-141
- Martin S, Thouzeau G, Chauvaud L and 3 others. 2006. Respiration, calcification, and excretion of the invasive slipper limpet, *Crepidula fornicata* L.: Implications for carbon, carbonate, and nitrogen fluxes in affected areas. Limnol Oceanogr 51(5):1996-2007
- Mccalister S L, Bauer JE, Canuel EA. 2006. Bioreactivity of estuarine dissolved organic matter: a combined geochemical and microbiological approach. Limnology and Oceanography 51(1):94-100
- Middelburg JJ, Nieuwenhuize J. 1998. Carbon and nitrogen stable isotopes in suspended matter and sediments from the Schelde Estuary. Marine Chemistry 60(3/4):217-225
- Hedges JI. 1992. Global biogeochemical cycles: progress and problems. Marine Chemistry 39(1-3):67-93
- Hung J, Lin PL, Liu KK. 2000. Dissolved and particulate organic carbon in the southern East China Sea. Continental Shelf Research 20:545-569
- Jonge VN de. 1980. Fluctuations in the organic carbon to chlorophyll a ratios for estuarine benthic diatom populations. Marine Ecology Progress Series 2:345-353
- Toggweiler JR. 1988. Deep-sea carbon, A burning issue. Nature 334(6182):468-468
- Widdows J, Brinsley MD, Salkeld PN, Elliott M. 1998. Use of annular flumes to determine the influence of current velocity and bivalves on material flux at the sediment-water interface. Estuarine and Coasts 21(4A):552-559
- Wu RSS. 1995. The environmental impact of marine fish culture: towards a sustainable future. Marine Pollution Bulletin 31(4-12):159-166
- Xia B, Zhang LJ. 2011. Carbon distribution and fluxes of 16 rivers discharging into the Bohai Sea in summer. Acta Oceanologica Sinica 30(3):43-54
- Zhang S, Gan WB, Ittekkot V. 1992. Organic matter in larger turbid river: Huanghe and its estuary. Marine Chemistry 38(1/2):53-68